

Cambio Climático y Aguas Superficiales en el Noroeste del Estado de México

Climate Change and Surface Water in Northwest of State Mexico

Marco Antonio Pérez-Luna*¹ y Fabiola Sagrario Sosa-Rodríguez²

Recibido: 13 de junio de 2024.

Aceptado: 10 de febrero de 2025.

Publicado: agosto de 2025.

RESUMEN

Antecedentes: los posibles impactos del cambio climático sobre el agua superficial en el noroeste del Estado de México podrían afectar su cantidad y distribución en un futuro próximo. **Objetivo:** cuantificar los recursos hídricos superficiales de la zona de estudio y determinar su comportamiento hacia el año 2050, considerando la influencia del cambio climático, brindaría herramientas que podrían ser utilizadas para su adecuada gestión. **Método:** se elaboró un balance hídrico superficial (BHS) para la época de sequía (de marzo a mayo) y la época de lluvias (de junio a septiembre) utilizando fórmulas empíricas para cada uno de los procesos. Posteriormente, se determinó un escenario de cambio climático contemplando la vía representativa de concentración 8.5 (RCP, por sus siglas en inglés). Se realizó un tratamiento y ajuste de la información climatológica empleando la metodología de corrección de sesgos. **Resultados:** los valores iniciales del BHS para el periodo de 1991 a 2020 muestran una precipitación media de 115,98 mm en temporada de sequía y de 774,61 mm en temporada de lluvias. Al incorporar el escenario de cambio climático tratado con la reducción de sesgos, se proyectó el BHS al año 2050, observándose una precipitación media de 48,43 mm en época de secas y de 282,70 en época de lluvias, así como un incremento en la temperatura media de 3,6 °C. **Conclusiones:** El posible impacto del cambio climático sobre el agua superficial del noroeste del Estado de México afectaría a las actividades humanas relacionadas con el agua, alterando la dinámica social de la población.

¹ Programa de Posgrado en Energía y Medio Ambiente (PEMA), Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Avenida San Rafael Atlixco 186, Colonia Vicentina, Alcaldía Iztapalapa, CDMX, 09340, México.

² Departamento de Economía, Área de Crecimiento y Medio Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Av. San Pablo 180, Colonia Reynosa Tamaulipas, Alcaldía Azcapotzalco, CDMX, 02200, México.

Palabras clave: balance hídrico superficial; cambio climático; Estado de México; RCP8.5.; reducción de sesgos.

ABSTRACT

Background: possible impacts of climate change on surface water in the northwest of the State of Mexico could affect its quantity and distribution in the near future. **Goal:** to quantify surface water resources in the study area and determine their behaviour towards the year 2050, considering the influence of climate change, would provide tools that could be used for their proper management. **Method:** a surface water balance (SWB) was created for the dry season (March to May) and the rainy season (June to September) using empirical formulas for each processes. Subsequently, a climate change scenario was determined using the representative concentration pathway 8.5 (RCP). The climatological information was processed and adjusted using the bias correction methodology. **Results:** The initial BHS values for the period 1991 to 2020 show an average precipitation of 115.98 mm in the dry season and 774.61 mm in the wet season. By incorporating the climate change scenario treated with bias reduction, the BHS was projected to 2050, showing an average precipitation of 48.43 mm in dry season and 282.70 in wet season, as well as an increase in average temperature by 3.6 °C. **Conclusions:** The potential impact of climate change on surface water in northwestern Mexico State could affect water-related human activities, altering the social dynamics of the population.

Key words: bias reduction; climate change; RCP8.5.; State of Mexico; surface water balance.

DOI:10.24275/TKNL4412

INTRODUCCIÓN

La conducta humana tiene un impacto significativo sobre la atmósfera, relacionado con el cambio climático, (Figueroa-Borja & Torrents, 2022). Dicho fenómeno genera riesgos para el ciclo hidrológico, alterando la intensidad y frecuencia de eventos meteorológicos extremos y aumentando la escasez hídrica (Pozo-Valdivieso, 2024).

Esta situación resulta alarmante, ya que el agua es crucial para la dinámica social y económica de las comunidades, donde actividades en sectores como la industria, la agricultura, la ganadería y el turismo han buscado maximizar el uso de este recurso en las últimas décadas. Sin embargo, el crecimiento poblacional exponencial y un modelo de producción y consumo insostenible han disminuido su disponibilidad, especialmente en fuentes superficiales afectando así, la calidad de vida de las personas (Godínez-Montoya *et al.*, 2021).

Bajo este contexto, surge la incertidumbre sobre el impacto del cambio climático en el agua de México, particularmente en el Estado de México (Fig. 1). De acuerdo con información de la Subdirección General Técnica de la Comisión Nacional del Agua (EDOMEX, 2018), de los 160 sitios evaluados en el año 2017, el 65% estaba fuertemente contaminado, el 18.1% tenía calidad aceptable y solo el 17% era de buena calidad, sin registros de calidad excelente; presentando un estatus de “déficit”, con una sobreexploitación de sus acuíferos que ha alcanzado los 20.167 m³/s desde el 2005 (Delgado, 2007), esta cifra ha aumentado debido a una distribución desigual y a la mala gestión territorial, altos niveles de contaminación y falta de mantenimiento en la infraestructura hídrica (Luna-López *et al.*, 2020).

Este panorama afecta principalmente a los municipios más vulnerables al cambio climático, específicamente en la zona noroeste del Estado, donde el índice de vulnerabilidad es mayor en relación con la producción ganadera, los asentamientos humanos, inundaciones y estrés hídrico (INECC, 2021). La incertidumbre aumenta por las características rurales (Madrigal-García & Rozga, 2014) y la dependencia del agua en esta región, junto a una mala gestión administrativa que ha provocado un intenso cambio en el uso del suelo (Álvarez-Arteaga *et al.*, 2020).

Este estudio tiene como objetivo identificar el escenario futuro de la relación entre cambio climático y agua superficial en la zona noroeste del Estado de México, mediante el análisis del balance hídrico superficial y su proyección en relación con las variables climáticas de precipitación y temperatura media establecidas en modelos climáticos regionales, en el marco del Experimento Regional Coordinado de Reducción de Escala (CORDEX, por sus siglas en inglés).

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona considerada en este estudio se ubica dentro de la Cuenca del Río Cutzamala, en la región Balsas. La vegetación predominante incluye bosques de pino, encino y oyamel, así como vegetación secundaria y pastizales. El suelo está constituido por andosoles, acrisoles, cambisoles, vertisoles, un poco de litosol y feozem, cuyas características de permeabilidad han facilitado actividades económicas como la agricultura de riego y temporal, el ecoturismo y el comercio (Montoya-García *et al.*, 2024).

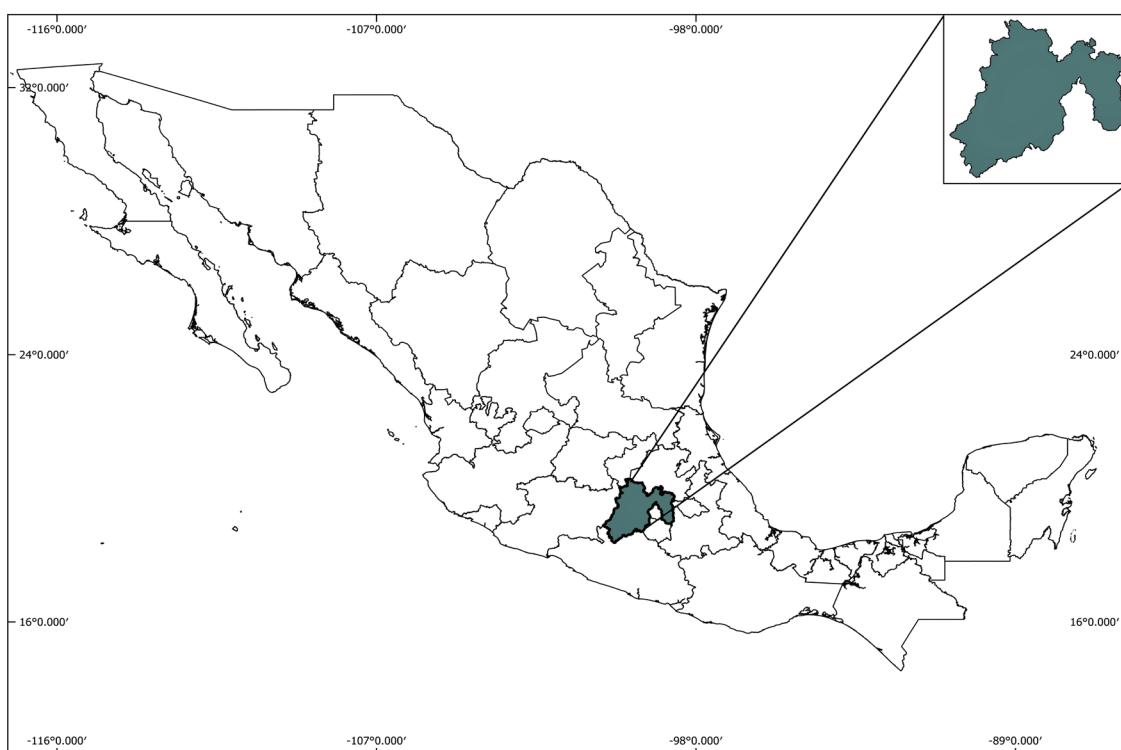


Figura 1: Ubicación geográfica del Estado de México. Fuente: Elaboración propia.

Para cuantificar el agua superficial en el área de estudio, se calculó el Balance Hídrico Superficial (BHS) considerando que el único aporte de agua proviene de la precipitación, mientras que las salidas solo consideran la evapotranspiración. Se asumió que no hay percolación por aguas superficiales y subterráneas, y el contenido de humedad para un periodo está totalmente disponible para el siguiente, independiente mente de su cantidad. No se registran aportes de riego y la diferencia entre el flujo subsuperficial entrante y saliente en el balance diario es nulo (Botei-Fullat & Moreno, 2015) por último, su valoración en el suelo será durante un año (Leiva-Gutiérrez, 2012).

Para este estudio, se consideraron únicamente las temporadas de secas (marzo a mayo) y lluvias (junio a septiembre), descartando los meses de octubre a febrero por ser considerados de estiaje (EDOMEX, 2012), utilizando datos históricos de al menos 30 años (WMO, 2018) para el periodo de 1991-2020. La ecuación 1 (Ordoñez, 2011) se empleó dentro de un polígono que abarcó gran parte de la zona.

$$Pm - ETr = Esc + Inf \quad (ec. 1)$$

Donde: Pm = Precipitación media (mm); ETr = Evapotranspiración (mm); Esc = Escorrentía superficial (mm); Inf = Infiltración (mm).

La representación del área se construyó con base en un modelo digital de elevación (MDE) empleando la información del relieve (Fig. 2, izq.), a través de las herramientas de hidrología del módulo de ArcToolbox incluida en ArcGIS 10.5 (Arias, 2019), utilizando la trayectoria descendente entre pixeles para determinar la dirección del flujo de agua y así, identificar las zonas de mayor acumulación superficial (Castillo, 2015), adicional a ello, se analizó la información diaria sobre precipitación y temperatura (mínima, máxima y media) registrada por las estaciones climatológicas ubicadas dentro del polígono (Fig. 2, der.).

De esta manera, se estimó la precipitación media (Pm) a través de la siguiente expresión (ecuación 2) (Pizarro & Flores, 2003; Pizarro-Vigil & Diaz, 2022), permitiendo identificar su distribución areal a través de isoyetas (Nieves-Vilchez *et al.*, 2022), siendo un método fundamental para identificar patrones espaciales y temporales y comprender las dinámicas climáticas y sus implicaciones en la gestión de recursos hídricos.

$$Pm = \sum_{i=1}^n \left(\frac{(P_{i+1} + P_i)/2 * S_{i+1,i}}{S_t} \right) \quad (ec. 2)$$

Donde: Pm = Precipitación media por temporada (mm); Pi = Se refiere a distancia de las isoyetas; $S_{i+1, i}$ = Representa la superficie entre dos isoyetas consecutivas y S_t = Superficie total (km²).

Para el cálculo de la evapotranspiración (ETr) se emplearon expresiones empíricas para cada una de las temporadas, en el caso de los meses de secas de utilizó la expresión de Thornthwaite (ecuación 3)

$$ETr_{\text{sin corregir}} = 1.6 * \left(\frac{10+T}{I} \right)^a \quad ETr_{\text{ajustada}} = ETr_{\text{sin corregir}} * F \quad (ec. 3)$$

Dónde:

$ETr_{\text{sin corregir}}$ = Evapotranspiración no ajustada (cm), T = Temperatura media mensual (°C), I = índice anual de calor, F = Factor de tabulado.

Se realizó de esta manera, debido a la lentitud y continuidad de pérdida de agua desde la superficie terrestre hacia la atmósfera, pero, sobre todo, debido a disponibilidad de recursos con que se cuenta, así como la exactitud y precisión en que la modelación se comporta dentro de una zona en específico debido a las variables que interactúan para su cálculo (Carvalho *et al.*, 2013).

Para los meses de lluvias se empleó la ecuación 4 de Coutagne, debido a las condiciones diferentes con respecto a la temporada de secas (Ruggieri *et al.*, 2021).

$$Etr = Pm - X * P^2 \quad X = \frac{1}{0,8+0,14*T} \quad (ec. 4)$$

Dónde: Etr = Evapotranspiración real (mm/temporada), Pm = Captación pluvial (mm/temporada), T = Temperatura media anual (°C/temporada).

Para el cálculo del escurrimiento superficial se empleó el método empírico establecido por la Comisión Nacional del Agua incluido en la Norma Oficial Mexicana NOM-11-2015 (DOF, 2015), conservación del recurso agua (ecuación 5).

$$Esc = Rc * Pm * A \quad (ec. 5)$$

Donde: Esc = Escorrentía superficial (m³/temporada); Pm = Precipitación media (mm); A = Representa la superficie (km²) y Rc = Coeficiente de escorrentía (adimensional).

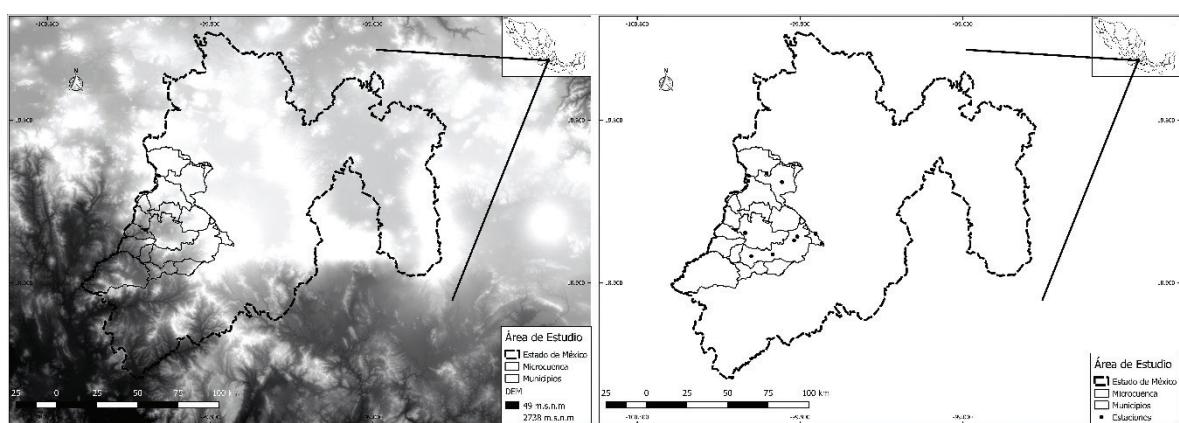


Figura 2: Microcuenca hidrológica (izq.), estaciones climáticas (der.). Fuente: Elaboración propia a partir de DEM obtenido en el CGIAR y estaciones climáticas georeferenciadas por el SMN.

El Rc se calculó en función de las variables del tipo de suelo, sus características y la cobertura vegetal de la zona de estudio, con esta información y con base en el coeficiente de uso de suelo ya establecido por la NOM-011-2015 se empleó la siguiente expresión.

$$Rc = \frac{K(P-250)}{2000} + \frac{k-015}{1.5} \quad (\text{ec. 6})$$

Finalmente, se determinó la infiltración utilizando la expresión de Monterroso-Rivas, *et al.*, (2016) (ecuación 7).

$$Inf = Pm - ETr - Vm \quad (\text{ec. 7})$$

Donde: Inf = Infiltración (mm/temporada); Pm = Captación pluvial (mm/temporada); ETr = Evapotranspiración real (mm/temporada); Vm : Volumen medio que puede escurrir (m³/temporada).

Proyección climática. Para conocer el escenario futuro de las variables climáticas y su relación con el BHS, se generó un ensamble de la información climática (temperatura media y precipitación) de 10 modelos climáticos regionales (MCR) de la plataforma CORDEX con la finalidad de mejorar su desempeño debido a la cancelación o minimización de los errores individuales por compensación que esto podría significar, (Penalba & Pántano, 2020; Small *et al.*, 2001; Nagy *et al.*, 2018; Medina, 2021; García-Bandala *et al.*, 2021; Medina-García *et al.*, 2019) (Tabla 1). Este tratamiento se realizó considerando únicamente la RCP 8.5, con el objetivo de abordar los impactos más severos del cambio climático.

El resultado se comparó con la información del BHS de las estaciones climatológicas entre 1991-2020, a las cuales se aplicaron pruebas métricas de validación como la del error cuadrático medio (RMSE), desviación estándar (STD) y correlación de Pearson (r) (Marcos-García *et al.*, 2020; Mistry *et al.*, 2022).

Dada la inconsistencia de los MCR por factores como la distribución parcialmente inconsistente con la evidencia de las observaciones, la teoría o la comprensión del proceso, parametrización de procesos físicos no resueltos en la dinámica, entre otros (Gutiérrez & Pons, 2006; Olcina-Cantos, 2019; Florian-Vergara *et al.*, 2021), es esencial recalibrar la dispersión bruta de tales conjuntos de modelos utilizando información de tendencias históricas, climatología y estimaciones probabilísticas de conjuntos de física perturbada para producir proyecciones del

clima futuro que sean consistentes con nuestra comprensión y con las observaciones del clima actual (Tokarska *et al.*, 2020).

Se utilizó el método de corrección de sesgos, comparando la información de las variables de precipitación y temperatura media dividida en tres bloques; histórico (1991-2020), el resultado del ensamble de la RCP8.5 (2021-2050) y los datos observados (1991-2020), ajustando el modelo a la información observada y posteriormente, esta función se aplicaría a la serie futura, este procedimiento se realizó con base en percentiles donde, para el caso de la precipitación, a cada percentil asignado se le multiplicó el valor observado entre la diferencia de los datos futuros e históricos. Para el caso de la temperatura media, el valor se corrigió añadiendo la diferencia de los percentiles de datos históricos y observados al cambio proyectado en el escenario que asimila la RCP8.5 (Saurral *et al.*, 2013) obteniendo así nuestro escenario climático (Tong *et al.*, 2021; Hernández-Díaz *et al.*, 2019).

RESULTADOS

El análisis del BHS para el periodo de 1991 al 2020 mostró un promedio de 52.63 mm/año en la temporada de secas y 188.48 mm/año en la de lluvias. Aunque se presentó un patrón durante las primeras dos décadas, en los últimos 10 años se observó una leve disminución en la precipitación durante el periodo de lluvias y un ligero aumento en la de secas (Fig. 3).

La proyección de las variables climáticas del ensamble de CORDEX y los datos climáticos observados, mostró diferencias significativas (Fig. 4) entre escenarios para cada uno de los pixeles. Donde se presenta información de percentiles extremos (considerados así para expresar la respuesta que tendría la inacción frente al cambio climático) del 10% (P10) y 90% (P90). Para el caso del 10% superior, se muestra una tendencia hacia los años más húmedos o calientes y el 10% inferior representa los límites en la tendencia de los años más secos o fríos.

Para la precipitación, el P10 mostró un límite porcentual de 0.88 en temporada de secas y de 0.90 en lluvias, lo que significaría una tendencia a la baja en el periodo proyectado; mientras que el P90 indicó un límite de 0.85 en temporada de secas y de 0.96 en lluvias mostrando una disminución del recurso.

Tabla 1: Modelos climáticos regionales.

MODELO REGIONAL	MODELO CLIMÁTICO GLOBAL	EXPERIMENTO	FRECUENCIA	VARIABLE
RCA4	CSIRO-Mk-3-6-0	Histórico, RCP8.5	Mensual	Pr, Tas
RCA4	CNRM-CM5	Histórico, RCP8.5	Mensual	Pr, Tas
RCA4	CanESM2	Histórico, RCP8.5	Mensual	Pr, Tas
RCA4	GFDL-ESM2M	Histórico, RCP8.5	Mensual	Pr, Tas
RCA4	IPSL-CM5A-MR	Histórico, RCP8.5	Mensual	Pr, Tas
RCA4	NorESM1-M	Histórico, RCP8.5	Mensual	Pr, Tas
RCA4	MIROC5	Histórico, RCP8.5	Mensual	Pr, Tas
RCA4	MPI-ESM-LR	Histórico, RCP8.5	Mensual	Pr, Tas
RCA4	HadGEM2-ES	Histórico, RCP8.5	Mensual	Pr, Tas
RCA4	EC-EARTH	Histórico, RCP8.5	Mensual	Pr, Tas

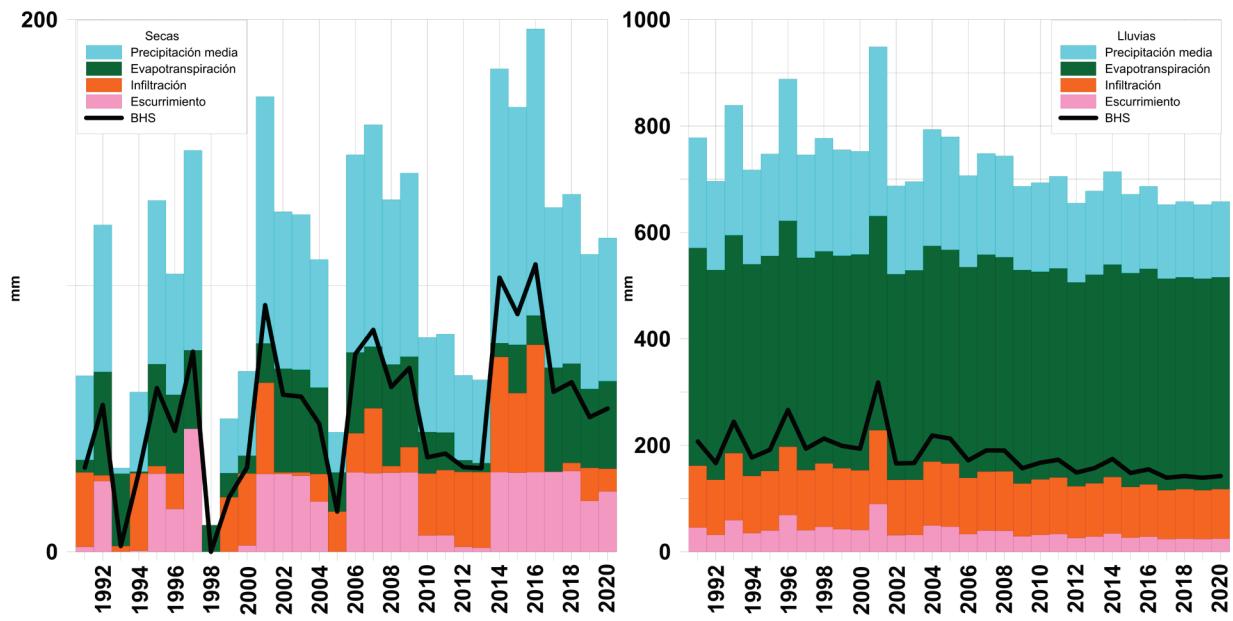


Figura 3: Balance hídrico superficial para la temporada de secas (izq.) y lluvias (der.).

En cuanto a la temperatura media, se observan incrementos moderados, para el P10 se muestra un límite porcentual de 1.42 en temporada de secas y 1.38 en lluvias cuya tendencia es al alta (Fig. 5).

Para el umbral del P90 se observan escenarios catastróficos, dado que para la temporada de secas se estimó un límite de 5.01 mientras que para lluvias el límite sería de 4.37 presentando años más secos y calientes que los hemos vivido hasta el 2020.

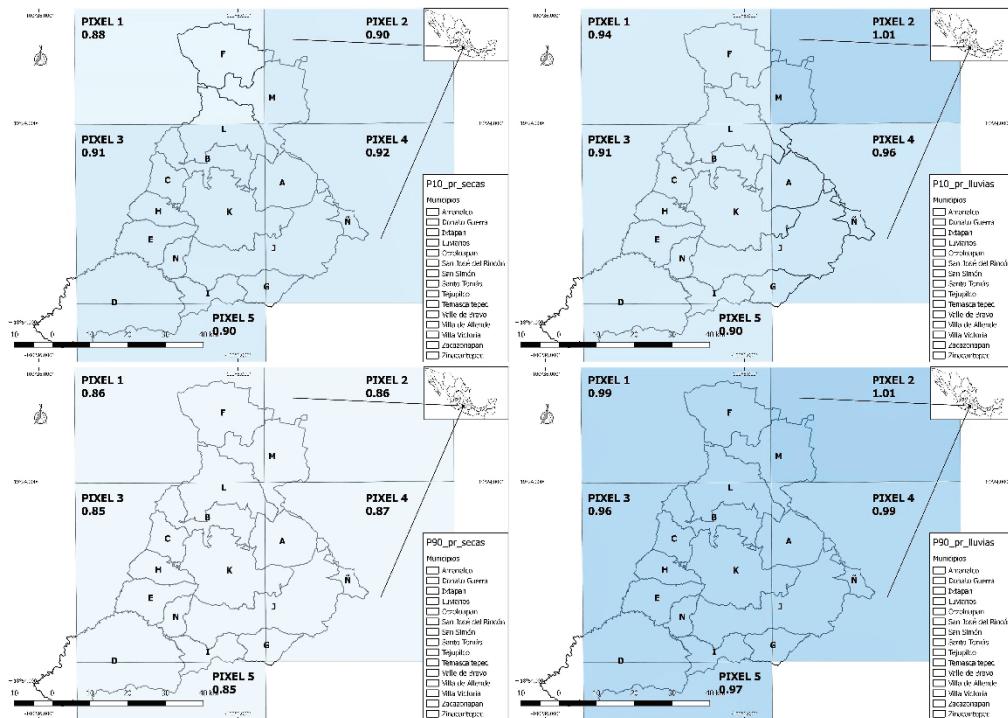


Figura 4: Proyección en percentiles de la precipitación al 2050. Fuente: Elaboración propia.

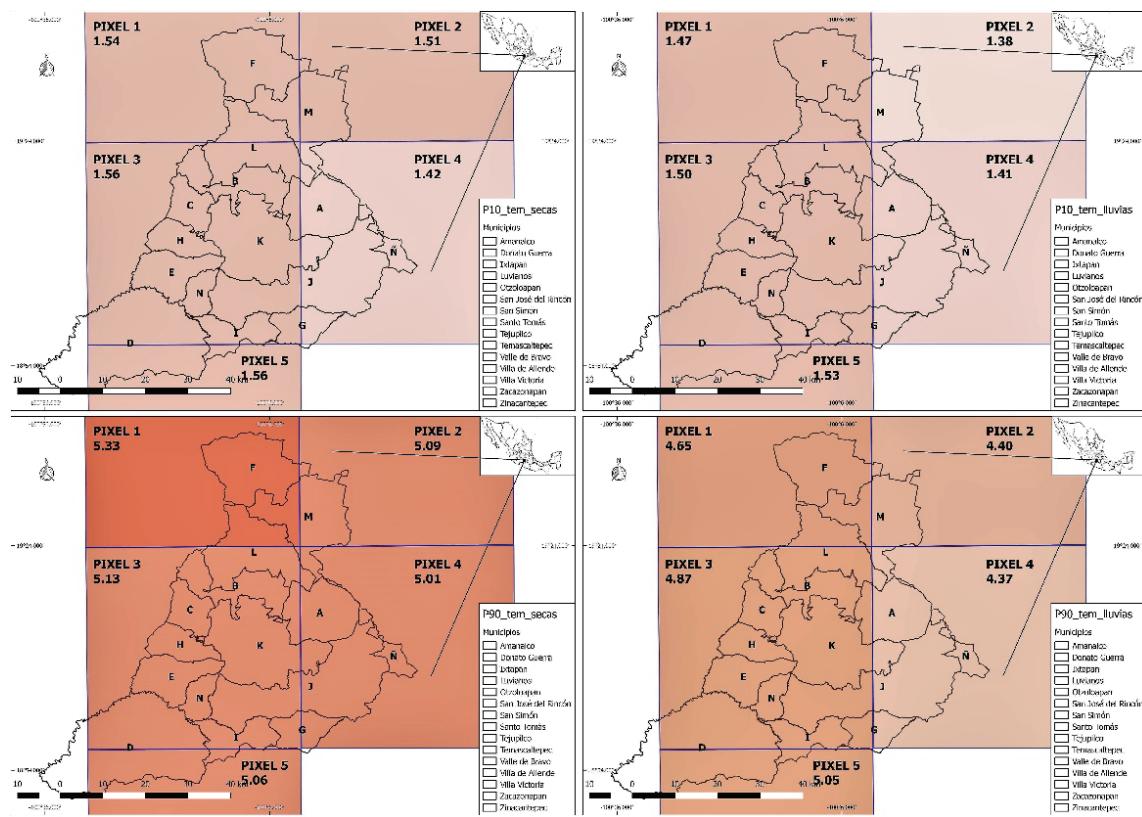


Figura 5: Proyección en percentiles de la temperatura media al 2050. Fuente: Elaboración propia.

El promedio de estos resultados sugiere un cambio drástico en el ciclo anual de las variables climáticas para 2021-2050 (Fig. 6). Donde la precipitación mostraría una estacionalidad similar a la de los datos observados; sin embargo, se proyectaría una reducción de más del 50% respecto al ciclo del periodo 1991-2020. En el caso de la variable de temperatura media, también se mantiene la estacionalidad, pero su proyección estaría representada por un incremento de 2.5°C en promedio al 2050 en la mayor parte del ciclo anual, lo que definitivamente alteraría la estructura de los componentes del BHS al año 2050 como se muestra en la figura 7. Donde se observa un cambio considerable en la precipitación media, ya que del promedio estimado para temporada de secas (115.98 mm) y de lluvias (774.61) en el periodo de 1991-2020; pasaría a 48.43 mm (temporada de secas) y 282.70 mm (temporada de lluvias) para el periodo de 2021-2050. Para el caso de la evapotranspiración se presentaría una reducción de cerca de 400 mm en época de lluvias y un 50% menos en temporada de secas (respecto al periodo 1991-2020). Para el escurreimiento superficial, se presentarían años con pequeñas cantidades de escurreimiento en temporadas de secas mientras que, para la temporada de lluvias, su comportamiento podría ser casi nulo con respecto al periodo base, donde se mostraba un promedio de 39.43 mm en lluvias y 18.48 mm en secas. Por último, el proceso de la infiltración, el cual se cuantificó durante el periodo de estudio base en 34.15 mm en temporada de secas y de 149.05 mm en lluvias, durante la proyección futura para ambas temporadas no logaría mantener un promedio de 25 mm.

DISCUSIÓN

Los datos obtenidos sugieren que, para el año 2050, la cuantificación del BHS en la zona de estudio podría experimentar una disminución de más del 50% en todos sus procesos: evapotranspiración, escurreimiento superficial e infiltración. Esta reducción se atribuye a la estrecha relación entre la precipitación y la temperatura, donde se proyecta una disminución del 62.81% en las precipitaciones anuales promedio registradas entre 1991 y 2020, indicando un aumento de años más secos hacia el 2050. Sin embargo, es importante considerar que la variable de precipitación en los MCR tiende a ser sobreestimada en el continente americano (Pántano & Penalba, 2018; Velásquez-Restrepo & Poveda, 2019; Gutiérrez *et al.*, 2023). Por otro lado, el modelo muestra una tendencia positiva en la temperatura media, con un incremento proyectado de 1.4°C (P10) a 4.73°C (P90), y un aumento promedio anual de 3.06°C, lo que implicaría un futuro más cálido con alternancias entre temporadas secas y lluviosas.

Estos hallazgos son coherentes con los observados por Guevara-Ochoa, *et al.* (2020), quienes resaltan la severidad y duración de los períodos secos y húmedos

bajo el comportamiento de la RCP8.5 en la cuenca superior del arroyo del Azul en Buenos Aires, Argentina. Así mismo, Fatemeh *et al.* (2021) concluyen que todos los ensambles de modelos climáticos y RCP proyectan un incremento de la temperatura de 3°C a 5°C anuales sobre los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río South

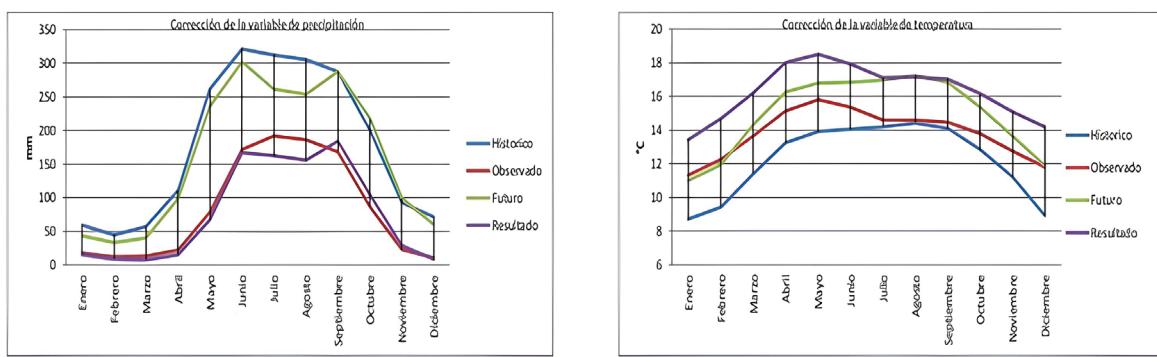


Figura 6: Resultado del método de corrección de sesgos en las variables de precipitación (izq.) y temperatura media (der.).

Platte en EE. UU. De manera similar, Mengistu *et al.* (2021) documentan una disminución del caudal hídrico en la cuenca del río Alto Nilo Azul (Abay), Etiopía.

El impacto del cambio climático en nuestra zona de estudio podría afectar negativamente el rendimiento en cultivos, dado que la productividad depende del ciclo de lluvias. También se anticipa un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos, así como discrepancias entre los tiempos de ocurrencia y retorno (Rodríguez-Moreno *et al.*, 2021). Adicionalmente, se prevé el surgimiento de problemáticas como la reducción del hábitat adecuado para las especies dependientes del clima y alteraciones en su distribución (Salazar-Borunda *et al.*, 2022).

No obstante, es fundamental reconocer que los MCR utilizados en esta investigación podrían variar debido a diversos factores, como cambios en el uso de suelo y la cobertura vegetal, las futuras emisio-

nes de gases efecto invernadero (GEI), la magnitud y ritmo del calentamiento global, la ubicación geográfica y los niveles de desarrollo y vulnerabilidad. Por lo que, la aplicación de la metodología de corrección de sesgos es particularmente crítica en el contexto de las proyecciones climáticas. Debido a que, los modelos climáticos, aunque sofisticados, a menudo presentan discrepancias con los datos observados. El análisis estadístico realizado con base en la corrección de sesgos permite ajustar estas proyecciones, garantizando que reflejen de manera más precisa las condiciones reales incrementando la fiabilidad de los resultados. Minimizando así, las incertidumbres que se presentan, a través de un enfoque integrado de modelización y calibración con lo que se mejora la representación espacial a pequeña escala del impacto del cambio climático en áreas específicas. Facilitando la creación de herramientas necesarias para abordar el desafío que representa el cambio climático sobre los recursos hídricos.

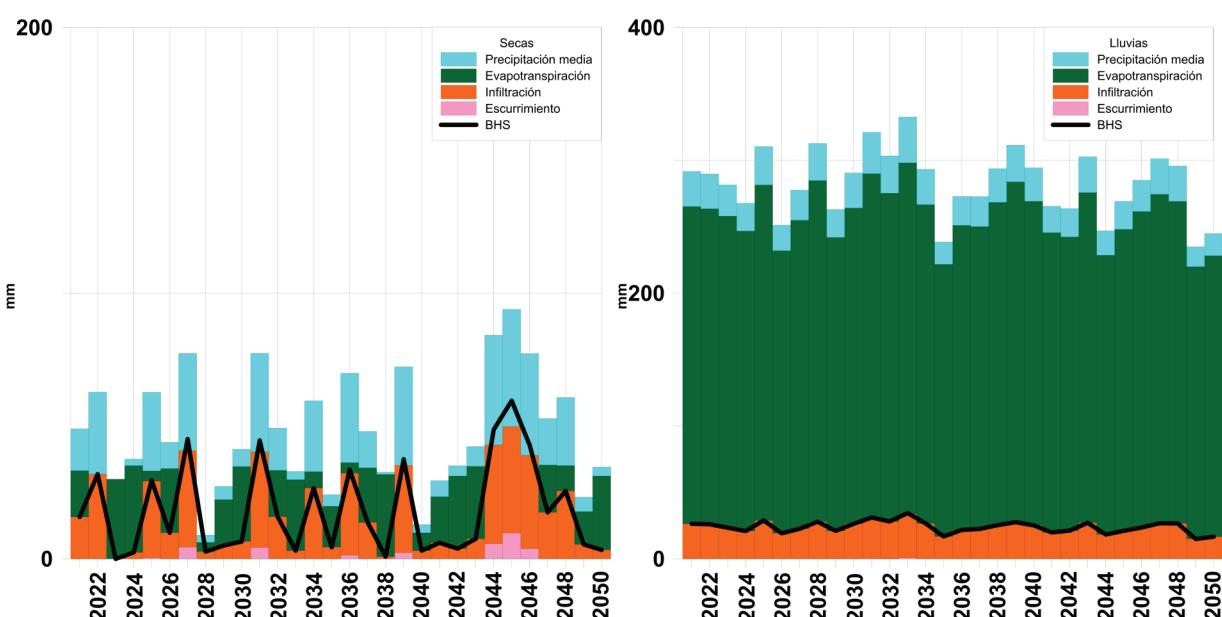


Figura 7: Proyección del BHS al año 2050 para temporada de secas (izq.) y temporada de lluvias (der.).

Este estudio ha permitido analizar la influencia de la precipitación y la temperatura en los procesos que conforman el balance hídrico de una zona en específica. A medida que la población y su demanda hídrica crecen, los procesos naturales que mantienen el agua superficial se ven sometidos a una presión creciente debido al uso insostenible del recurso. Esta presión se intensificará en el contexto de las alteraciones climáticas provocadas por los posibles escenarios que representa el cambio climático.

De esta manera podemos concluir que los resultados aquí presentados invitan a reflexionar sobre un futuro potencial en el que la inacción frente al cambio climático prevalezca. Es fundamental diseñar estrategias e implementar acciones que establezcan la estructura jurídica necesaria para abordar esta problemática, promoviendo al mismo tiempo una participación más activa de la población. Se requieren políticas locales centradas en la gestión integral del recurso hídrico a corto, mediano y largo plazo, desde una perspectiva holística que permita a la sociedad y sus diversas estructuras sociales y económicas utilizar el recurso de manera sostenible, al tiempo que se protege la capacidad natural de adaptación y resiliencia de los ecosistemas.

REFERENCIAS

- ÁLVAREZ-ARTEAGA, G., H. A. IBÁÑEZ, M. E. OROZCO, & B. GARCÍA. 2020. Regionalización de indicadores de calidad para suelos degradados por actividades agrícolas y pecuarias en el altiplano central de México. *Quivira Revista de Estudios Territoriales* 22 (2): 5-19. Disponible en línea: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40165706001>
- ARIAS, J. D. 2019. Herramientas de apoyo mediante los sistemas de información geográfica (SIG) para la estructura de las cuencas hidrográficas en la Dirección de Gestión Ambiental del Sistema Hídrico (DGASH) dentro de la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAB-ESP). Tesis de especialidad (Administración ambiental). Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. 39 p. Disponible en línea: <http://hdl.handle.net/11349/13025>
- BOTEY-FULLAT, R., & J. V. MORENO. 2015. *Metodología para estimar la humedad del suelo mediante un balance hídrico exponencial diario*. Agencia Estatal de Meteorología, Área de Climatología y Aplicaciones Operativas. Reporte técnico. Madrid-España, 22 p. Disponible en línea: https://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/balance_hidrico/Metodologia.pdf
- CARVALHO M., R. L. DE CARVALHO, G. VIANELLO, M. SEDIYAMA, A. DE OLIVEIRA, & JUNIOR DE SÁ. 2013. Geostatistical improvements of evapotranspiration spatial information using satellite land surface and weather stations data. *Theoretical and Applied Climatology* 113 (1-2): 155-174. DOI: 10.1007/s00704-012-0772-1
- CASTILLO, F. A. 2015. Delimitación automática de microcuencas utilizando datos SRTM de la NASA. *Enfoque UTE* 6 (4) : 81-97 p. Disponible en línea: DOI: 0.29019/efoquete.v6n4.80
- DELGADO, J. 2007. ¿Guerra por el agua en el valle de México? Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México. *Investigaciones geográficas* (62): 158-163. Disponible en línea http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&id=S0188-46112007000100011&lng=es&tlng=es
- DOF, (DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN). 2015. *Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015: Conservación del recurso agua, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. Comisión Nacional del Agua. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México. Marzo 15. Disponible en línea: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015
- EDOMEX, (GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO). 2012. Programa para mejorar la calidad del aire en el Valle de Toluca (2012-2017). Secretaría del Medio Ambiente. Estado de México. 220 p. Disponible en línea: <https://proaire.edomex.gob.mx/sites/proaire.edomex.gob.mx/files/files/mis%20pdf/ProAire%20Valle%20de%20Toluca%202012-2017.pdf>
- EDOMEX, (GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO). 2018. Programa Hídrico Integral del Estado de México 2017-2023. Comisión de Agua del Estado de México. Estado de México. 212 p. Disponible en línea: <https://agua.edomex.gob.mx/sites/agua.edomex.gob.mx/files/files/AcercaCAEM/PHIEM1.pdf>
- FATEMEH, A., RYAN T. B., & A. MAZDAK. 2021. Appraising climate change impacts on future water resources and agricultural productivity in agro-urban river basins. *Science of The Total Environment* 788 (2021): 34-41. Disponible en línea: DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147717
- FIGUERAS, B. M., & A. TORRENTS. 2022. El futuro está por crear: temporalidad e imaginación en el Antropoceno. *Artnodes revista de arte, ciencia y tecnología*, 29: 1-9. Disponible en línea: DOI: 10.7238/artnodes.v0i29.392989
- FLORIAN-VERGARA, C., H. D. SALAS, & A. BUILES-JARAMILLO. 2021. Análisis de la precipitación y la evaporación en el Orinoco colombiano según los modelos climáticos regionales del experimento CORDEX-CORE. *TecnoLógicas* 24 (52): 242-261. Disponible en línea: DOI: 10.22430/22565337.2144
- GARCIA-BANDALA M., A. N. GARCIA-BELTRÁN, G. MEDINA-GARCÍA, M. SERVÍN-PALESTINA, & N. RAMÍREZ-CABRAL. 2021. Efecto posible del cambio climático sobre la demanda de agua de cultivos importantes en Zacatecas. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 20 (2): 1-17.
- GUEVARA-OCHOA, C., A. MEDINA-SIERRA & L. VIVES. 2020. Spatio-temporal effect of climate change on water balance and interactions between groundwater and surface water in plains. *Science of The Total Environment* 722 (2020): 1-17. Disponible en línea: DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137886
- GODÍNEZ-MONTOYA, L., H. E. FIGUEROA, & S. F. PÉREZ (Eds). 2021. *Ánalisis de la Influencia de las variables socioeconómicas sobre el Medio Ambiente en México*. Primera ed. Asociación Mexicana de Investigación Interdisciplinaria A.C. (ASMIA, A.C.). UAEM. Estado de México. ISBN: 978-607-99509-0-3. Disponible en línea: <http://hdl.handle.net/20.500.11799/111893>
- GUTIÉRREZ, J. M. & M. R. PONS. 2006. Modelización numérica del cambio climático: bases científicas, incertidumbres y proyecciones para la Península Ibérica. *Revista de Cuaternario y geomorfología* 20 (3-

- 4): 15-28. Disponible en línea: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/ articulo?codigo=2200478>
- GUTIÉRREZ, R., C. JUNQUAS, E. ARMIJOS, A. SÖRENSSON, & ESPINOZA, J. 2023. Simulaciones de la precipitación de verano por modelos climáticos regionales de CORDEX en la zona de transición Andes-Amazonía. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú 10 (02): 11-15. Disponible en línea: <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5408>
- HERNÁNDEZ-DÍAZ, L., O. NIKIÉMA, R. LAPRISE, K. WINGER, & S. DANDOY. 2019. Effect of empirical correction of sea-surface temperature biases on the CRCM5-simulated climate and projected climate changes over North America. *Climate Dynamics* 53(1-2): 453-476. DOI: 10.1007/s00382-018-4596-2
- INECC, (INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO). 2021. Municipios Vulnerables al Cambio Climático. Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 60 p. Disponible en línea: <https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/atlas/mapa>
- LEIVA-GUTIÉRREZ, N. 2012. Metodología para el cálculo de la humedad del suelo usando parámetros topográficos (MDE), climáticos y edáficos en un sector del piedemonte depositacional del municipio de Villavicencio. Tesis de Maestría en Geomática. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia, pp. 91.
- LUNA-LÓPEZ, R., R. M. HERNÁNDEZ, G. J. CASTELLÓN, & A. RAMÍREZ. 2020. Un acercamiento a la problemática hídrica en México: Conflictos por el agua en un territorio hortícola del Acuífero Valle Tecamachalco. *Diversidad*, (19): 42-57.
- MADRIGAL-GARCÍA, L. & E. ROZGA (Eds.). 2014. *Una propuesta del método de análisis del desarrollo económico local: el caso de algunos territorios locales del Estado de México*. Primera ed. Centro de Investigación en Estudios Avanzados en Planeación Territorial, Facultad de Planeación Urbana y Regional, UAEMex. Estado de México. 236 p. 978-607-422-495-5.
- MARCOS-GARCÍA, P., Z. F. VARGAS, A. LÓPEZ, P. A. GARCÍA, & V. M. PULIDO. 2020. Análisis de impactos del cambio climático en las sequías meteorológicas, edáficas e hidrológicas en el Sistema de Explotación del río Júcar. *JIA*, 215-224 p. Disponible en línea: <http://hdl.handle.net/10251/138450>
- MEDINA, C. 2021. Modelación Hidrológica bajo Escenarios de Cambio Climático para un Embalse de Abastecimiento de Agua en La Paz, Bolivia. *Investigación & Desarrollo*, 21 (1): 63-78. Disponible en línea: DOI: 10.23881/1dupbo.021.1-51
- MEDINA-GARCÍA, G., J. GRAGEDA-GRAGEADA, J. RUIZ-CORRAL, J. CASAS-FLORES, V. RODRÍGUEZ-MORENO, & C. MORA-OROZCO. 2019. Disminución de las horas frío como efecto del cambio climático en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 10 (6): 1325-1337. Disponible en línea: DOI: 10.29312/remexca.v10i6.1688
- MENGISTU, D., B. WOLDEAMLAK, A. DOSIO & P. HANS-JUERGEN. 2021. Climate change impacts on water resources in the Upper Blue Nile (Abay) River Basin, Ethiopia, *Journal of Hydrology* 592 (2021): 15. Disponible en línea: DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125614
- MISTRY, M. N., R. SCHNEIDER, P. MASSELOT, D. ROYÉ, B. ARMSTRONG, J. KYSÉLY, H. ORRU, F. SERA, S. TONG, É. LAVIGNE, A. URBAN, J. MADUREIRA, D. GARCÍA-LEÓN, D. IBARRETA, J. C. CISCAR, L. FEYEN, E. DE SCHRIJVER, Z. DE SOUSA, M. PASCAL, A. TOBIAS & A. GASPARINI. 2022. Comparison of weather station and climate reanalysis data for modelling temperature-related mortality. *Scientific reports* 12(1): 1-14. Disponible en línea: DOI: 10.1038/s41598-022-09049-4
- MONTERROSO-RIVAS, A., A. G. RAMÍREZ-GARCÍA, J. GÓMEZ-DÍAZ, Y. VELÁZQUEZ-JUÁREZ, & R. RENDÓN-MEDEL. 2016. Cambio en la disponibilidad hídrica futura en un bosque mesófilo de montaña de México, *Interciencia* 41 (4): 266-272. Disponible en línea: <https://www.redalyc.org/articulo/oa?id=33944929008>
- MONTOYA-GARCÍA, D. N., & E. CADENA-VARGAS. 2024. Impacto del metabolismo socio-urbano en el Estado de México, México 2010-2020. *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (35): 158-178. Disponible en línea: DOI: 10.17141/letrasverdes.35.2024.6087
- NAGY, G., M. BIDEGAIN, J. VEROCAI, & B. DE LOS SANTOS. 2018. Escenarios climáticos futuros sobre Uruguay. Basados en los nuevos escenarios socioeconómicos RCP. *Project Report PNUD URU/11/G31, Climate Change Division; MVOTMA*: Montevideo, Uruguay, 2016. 1-50 p. Disponible en línea en: <https://www.researchgate.net/publication/323996152>
- NIEVES-VILCHEZ, I., H. J. CASTILLO-INFANTE, J. CARILLO-ESPINOZA, & N. B. PAMPÀ-QUISPE. 2022. Estudio hidrológico de una cuenca para la evaluación del potencial de un pico central hidroeléctrica en una zona rural. *Tecnología y ciencias del agua* 13 (1): 292-332. DOI: 10.24850/j-tyca-2022-01-07
- OLCINA-CANTOS, J. 2019. Evidencias e incertidumbres del Cambio Climático y de los riesgos asociados en el Litoral Mediterráneo español. *Boletín de la Real Sociedad Geográfica, (CLIV)*, 9-34. Disponible en línea en: <https://boletinrsg.com/index.php/boletinrsg/article/view/77>
- ORDOÑEZ, J. 2011. Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico. *Balance Hídrico Superficial*, 20-36 p. ISBN: 978-9972-602-75-7
- PÁNTANO, V. & O. PENALBA. 2018. Respuesta del suelo a proyecciones de largo plazo de temperatura y precipitación extrema en la cuenca sur del Plata. *Theoretical and Applied Climatology* 134 (2018): 1257-1268. Disponible en línea: DOI: 10.1007/s00704-017-2339-7
- PENALBA, O. & V. PÁNTANO. 2020. Proyecciones de los flujos de agua en el suelo a partir de los modelos climáticos globales del CMIP5 en Sudamérica y su impacto regional; Asociación Argentina de Agrometeorología; *Revista Argentina de Agrometeorología* X 6 (2020): 1-13. Disponible en línea: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/113406>
- PIZARRO, R., C. RAMÍREZ & J. P. FLORES. 2003. Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos. *Bosque (Valdivia)*, 24 (3): 31-38. Disponible en línea: DOI: 10.4067/S0717-92002003000300003
- PIZARRO-VIGIL, J. L., & J. G. DÍAZ. 2022. Renovación urbana del sector Tuctilla para optimizar el espacio público y residencial, Amazonas,

- Perú, 2021. *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales E Ingeniería*, 5 (1): 0-14. DOI: 10.25127/ucni.v4i3.801
- POZO-VALDIVIESO, E. 2024. Evaluación de la disponibilidad de agua en la Cuenca Alta del Río Guayllabamba bajo el efecto de escenarios de cambio climático: Simulación de escenarios futuros de disponibilidad de agua en base a situaciones climáticas extremas observadas en el pasado. Trabajo de Integración Curricular. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Ecuador, Quito. Pp. 72
- RODRÍGUEZ-MORENO, V., G. MEDINA, G. PADILLA, J. CORRAL, A. ESTRADA, & J. RUVACABA. 2021. ¿Por qué México es un país altamente vulnerable al cambio climático? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12 (25): 45-57. Disponible en línea: DOI: 10.29312/remexca.v12i25.2819
- RUGGIERI, G., V. ALLOCÀ, F. BORFECCHIA, D. CUSANO, P. MARSIGLIA, & P. DE VITA. 2021. Testing Evapotranspiration Estimates Based on MODIS Satellite Data in the Assessment of the Groundwater Recharge of Karst Aquifers in Southern Italy. *Water*, 13 (2): 118. Disponible en línea: DOI: 10.3390/w13020118
- SALAZAR-BORUNDA, M. A., M. E. PEREDA-SOLÍS, P. M. LÓPEZ-SERRANO, J. A. CHÁVEZ-SIMENTAL, J. H. MARTÍNEZ-GUERRERO, & L. A. TARANGO-ARÁMBULA. 2022. Climate change will affect the distribution of the Mexican Spotted Owl (*Strix occidentalis lucida* Nelson 1903). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 28(2): 305-318 p. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2021.10.066
- SAURRAL, R., B. MONTROUILL & A. CAMILLONI. 2013. Development of statistically unbiased twenty-first century hydrology scenarios over La Plata Basin. *International Journal of River Basin Management* 11(4): 329-343. DOI: 10.1080/15715124.2014.885440
- SMALL, E. E., F. GIORGI, L. C. SLOAN, & S. HOSTETLER. 2001. The Effects of Desiccation and Climatic Change on the Hydrology of the Aral Sea. *Journal of Climate*, 14(3): 300-322. Disponible en línea: DOI:10.1175/1520-0442(2001)013<0300:TEODAC>2.0.CO;2
- TOKARSKA, K. B., M. B. STOLPE, S. SIPPEL, E. M. FISCHER, C. SMITH, F. LEHNER, & R. KNUTTI. 2020. Past warming trend constrains future warming in CMIP6 models. *Science advances*, 6(12): 1-13. Disponible en línea: <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/sciadv.aaz9549>
- TONG, Y., X. GAO, Z. HAN, Y. XU, & F. GIORGI. 2021. Bias correction of temperature and precipitation over China for RCM simulations using the QM and QDM methods. *Climate Dynamics*, 57(5): 1425-1443. Disponible en línea: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05447-4>
- VELÁSQUEZ-RESTREPO, M., & G. POVEDA. 2019. Estimación del balance hídrico de la región Pacífica Colombiana. *Dyna*, 86(208): 297-306. Disponible en línea: DOI: 10.15446/dyna.v86n208.73587
- WMO, (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION). 2018. Guide to climatological practices. Geneva, Switzerland. 117 p. Disponible en línea: <https://posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2017/04/MET-480-WMO-100.pdf>